ARCADAS DE LADRILLO

por

JOSÈ MIGUEL ÀVILA JALVO Y MIGUEL ÀVILA NIETO



CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

1-19-05

ARCADAS DE LADRILLO

por

José Miguel Àvila Jalvo y Miguel Àvila Nieto

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

1-19-05

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA

NUMERACIÓN

2 Área
51 Autor
09 Ordinal de cuaderno (del autor)

0 VARIOS
1 ESTRUCTURAS
2 CONSTRUCCIÓN
3 FÍSICA Y MATEMÁTICAS
4 TEORÍA
5 GEOMETRÍA Y DIBUJO
6 PROYECTOS
7 URBANISMO
8 RESTAURACIÓN

Arcadas de ladrillo

Instituto Juan de Herrera.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
Gestión y portada: Nadia Soddu.
CUADERNO 304.01 / 1-19-05
ISBN: 978-84-9728-331-1
Depósito Legal: M-20821-2010

Este trabajo es consecuencia del análisis constructivo que realizamos del Cuartel de Guardias de Corps o del Conde-Duque, de Madrid, por encargo del Área de las Artes de su Ayuntamiento. Del edificio de Ribera queda poco, por que dos incendios lo arruinaron en el XIX y, con sus restos, se reconstruyó una obra cuartelaria de la que queda hoy –y eso nos trae aquí– una estructura interior de arcadas de ladrillo, que tanto abunda en el patrimonio histórico, debido a su sencillez técnica, bajo costo y rápida ejecución.

Tras el peritaje de estas arcadas, pensamos en la conveniencia de un análisis mecánico genérico de este tipo estructural, cuyas baja resistencia y repercusión de sobrecarga lo alejan de otras formas abovedadas. Era un tema sugerente pues requiere comprobaciones específicas y sus resultados limitan la capacidad que se suele otorgar, sin ningún cálculo, a todo lo que tenga forma de arco.

Este trabajo tiene dos capítulos: el primero, dedicado al procedimiento de cálculo; el segundo, a prontuario, cuyos ábacos permiten conocer tensiones y empujes. Se incluye un ejemplo para ayudar al uso de esta información gráfica.

ARCADAS DE LADRILLO

José Miguel Ávila Jalvo y Miguel Ávila Nieto

Una arcada tiene aspectos mecánicos específicos que la diferencian de un arco o una bóveda independiente. En edificación, estos suele estar en los techos o en los sótanos, por lo que no inciden con tanta intensidad cuestiones frecuentemente asociadas al trabajo de las arcadas y que se pueden resumir en las siguientes:

- Tienen forjados encima y son ligeras, por lo que el peso permanente no tiene la dominancia de otras obras abovedadas, lo que afecta a que:
    - o los edificios rehabilitados van a tener generalmente mayores sobrecargas que las que tuvieron antes,
    - o la alternancia de sobrecargas no es irrelevante, y
    - o es frecuente que la rehabilitación incluya cargas concentradas, como las de nuevas divisiones del espacio interior
- y, con mucha frecuencia, están construidas con ladrillo.

Esto exige comprobar su capacidad para soportar sobrecargas alternadas y concentradas así como para resistir las tensiones que se producen en un material débil. Si ninguno de estos aspectos es ajeno al cálculo genérico de arcos, su especificidad ha motivado este trabajo.

- o -

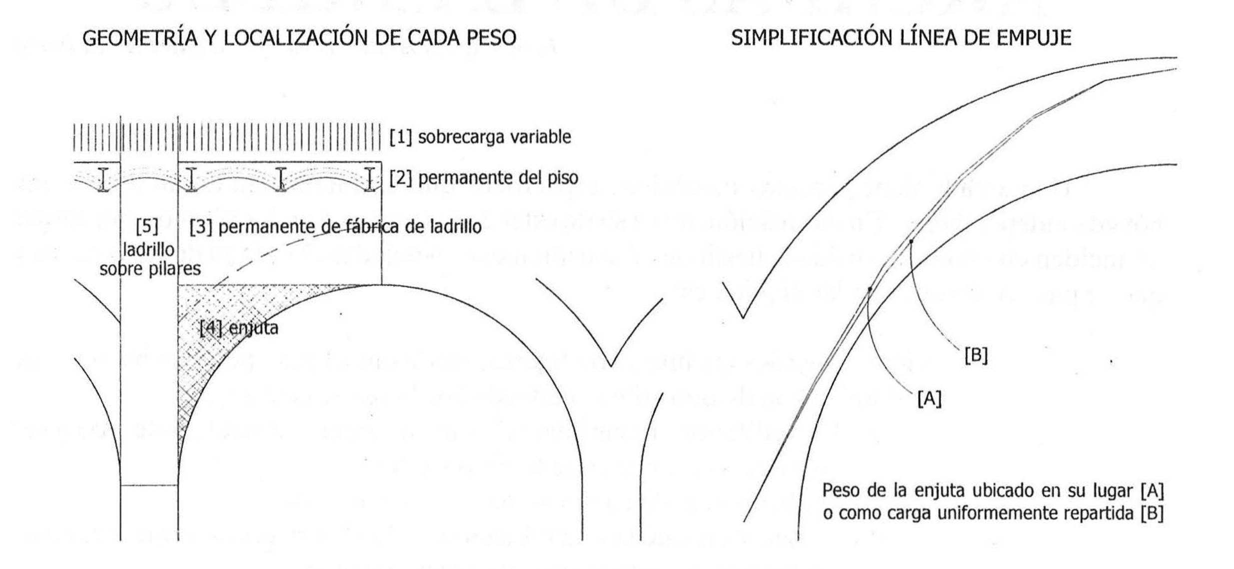
Los forjados de muchos edificios antiguos han venido soportando sobrecargas bajas, incluso inferiores a 2 kN/cm², luego habrá un aumento de sobrecarga tras la rehabilitación. El peso permanente de la arcada y forjado apoyado en ella es del orden de doble o triple que las sobrecargas, lo que está alejado de los tipos actuales, por lo que la alternancia es significativa. Otro aspecto a estudiar es la capacidad de la arcada para admitir cargas concentradas que procedan, por ejemplo, de las nuevas divisiones ocasionadas por las obras de remodelación de las distribuciones interiores. Finalmente, el ladrillo tiene una resistencia muy limitada que obliga a que la resultante de la compresión en cada sección del arco tenga excentricidad reducida.

1

ELEMENTOS PARA EL CÁLCULO DE ARCADAS
LÍNEA DE EMPUJE ÓPTIMA Y CONCEPTO DE SEGURIDAD

1.1.- FORMA DE LA LÍNEA DE EMPUJE

En una arcada, la mayor parte del peso está uniformemente repartido. Este es el caso de la sobrecarga [1], del peso permanente del piso [2] y de la fábrica de ladrillo que haya entre clave y forjado [3]. No lo es, solamente, el triángulo curvilíneo de la enjuta [4]. El concentrado sobre el pilar [5] no produce flexión, por quedar fuera del ojo del arco.



Como la ley de carga se simplificaría mucho si el peso de ese triángulo [4] se repartiera uniformemente en toda la longitud, se ha medido el error que se comete con ello, y resulta tan reducido que es admisible asimilarlo a un carga uniforme. En el gráfico derecho se han dibujado dos líneas de empuje(1): con el peso de la enjuta en su lugar [A] y distribuido uniformemente [B]. La diferencia mayor entre ambas no llega al 2,5%.(2)

Usando esta simplificación, o sea, admitiendo que todo el peso fuera uniformemente distribuido, la línea de empuje es parabólica, proporcional al diagrama de momentos.

1 Para que las dos curvas sean comparables se ha igualado su altura o brazo de palanca, o sea, ambas coinciden en la clave y en el arranque.

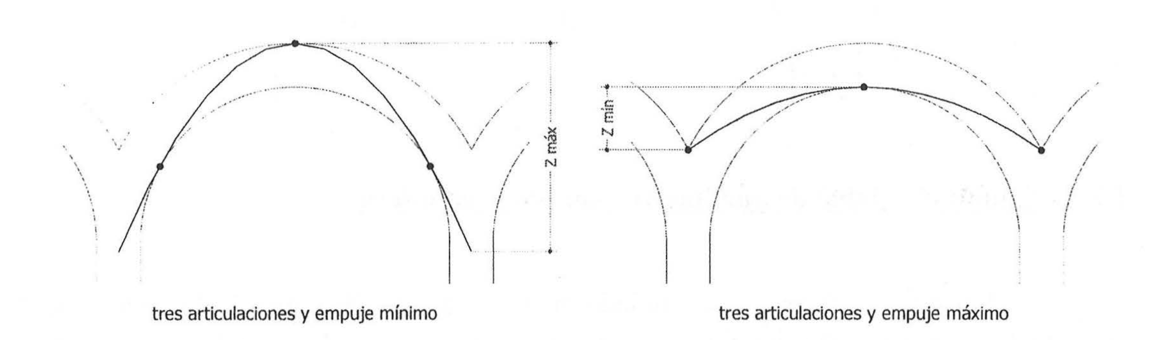
2 Para modulaciones grandes de arcos y forjados (5 metros), 2,41%; para medias (3,75 metros), 1,85%, y para pequeñas (2,5 metros), 1,20%.

1.2.- CARGA UNIFORME Y LÍNEA DE EMPUJE ÓPTIMA

1.2.1.- Criterio para definir el trazado óptimo de la línea de empuje

Un arco es una estructura hiperestática por lo que dispone de múltiples situaciones de equilibrio para la misma ley de carga. Esto quiere decir que puede haber distintas parábolas o líneas de empuje sólo variando la escala vertical[3]. Por razones que se comentan en el siguiente párrafo, ninguna puede salir de la geometría del arco, por lo que todas quedan situadas, por ahora, entre dos trazados límite, como señala la siguiente figura: La máxima altura 'z' se alcanza cuando la parábola es tangente por el extradós de la clave (empuje mínimo) y la mínima altura 'z', cuando lo es por el intradós de la clave (empuje máximo).[4]

La línea de empuje podría salir del arco sin riesgo sólo si el material resistiera tracciones. La tangencia sólo es posible si el material fuera infinitamente resistente a compresión y absolutamente rígido, ya que, si tiene resistencia infinita a compresión, puede ser tangente al arco sin aplastarse, y, si fuera deformable, la geometría se alteraría y la parábola rebasaría las lindes del arco deformado.



tres articulaciones y empuje mínimo — tres articulaciones y empuje máximo

Como el ladrillo tiene una resistencia baja a compresión, la distancia a los bordes es un factor relevante, puesto que a menor excentricidad de la línea de empuje, menor tensión. De modo que la gama de parábolas queda restringida a aquellas cuya combinación esfuerzo/excentricidad produzca tensiones menores a la resistencia del material a lo largo de todas las secciones del arco. Y, de todas las parábolas, hay una cuya tensión máxima es menor que las alcanzadas por las demás líneas de empuje. Es la más centrada con la directriz del arco y, además, la que produce mínima deformación. Esta es la línea de empuje que aquí se define como óptima.

---

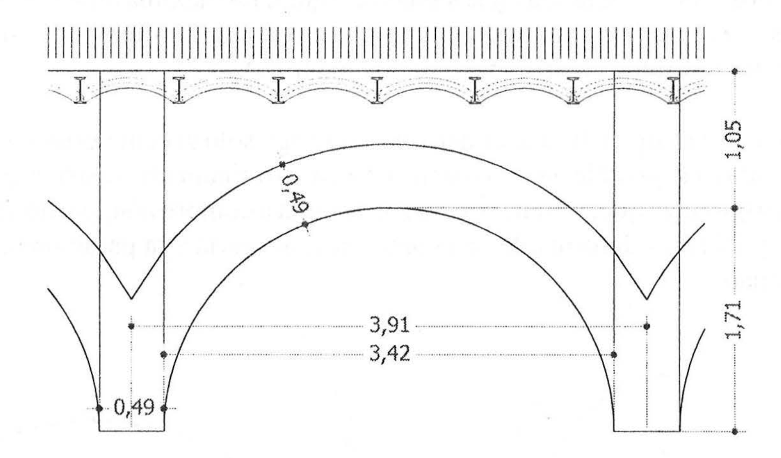
3 Como la carga situada sobre el soporte no produce flexión, si se hace el cálculo afinado, la línea de empuje es un segmento de parábola en la zona del vano, pero se ha llamado parábola a todo por simplificar el texto.

4 En el caso de empuje máximo, se ha hecho coincidir los extremos de la parábola con el extradós en los arranques, a pesar de que las enjutas también suelen ser de ladrillo, y eso permitiría empujes muy superiores (limitados sólo por la carga de pandeo o por la resistencia del ladrillo, al caber una recta –límite de la parábola– dentro del material). Pero entrar con la línea de empuje en esta zona puede llevar a deslizamientos entre ladrillos, ya que el ángulo de rozamiento es inferior al que forma la línea de empuje con la normal a las juntas. Esto queda matizado si se considera que esas hiladas están confinadas entre las roscas, pero no es prudente superar esa cota en este ejercicio genérico. Otra cosa es que esa intrusión explique situaciones concretas construidas, como también sus agrietamientos.

1.2.2.- Datos para seguir el procedimiento numéricamente

En este capítulo se estudia la mecánica de una arcada para describir su procedimiento de cálculo. Para facilitar su seguimiento se usa un ejemplo concreto con las siguientes dimensiones.

La luz a ejes de pilares es de 3,91 m. El ancho de las arcadas, el grueso de la rosca y el canto de los pilares es de 49 cm. La luz de ambos forjados es de 4,00 m y su peso permanente (propio, solado y tabiquería ligera), 4,00 kN/m². El peso específico del ladrillo 18 kN/m^3 (ladrillo macizo). La forma del intradós de los arcos es media circunferencia y el extradós es paralelo a él y se corta en el eje de los pilares con los arcos adyacentes.



1.2.3.- Equilibrio global de una línea de empuje cualquiera

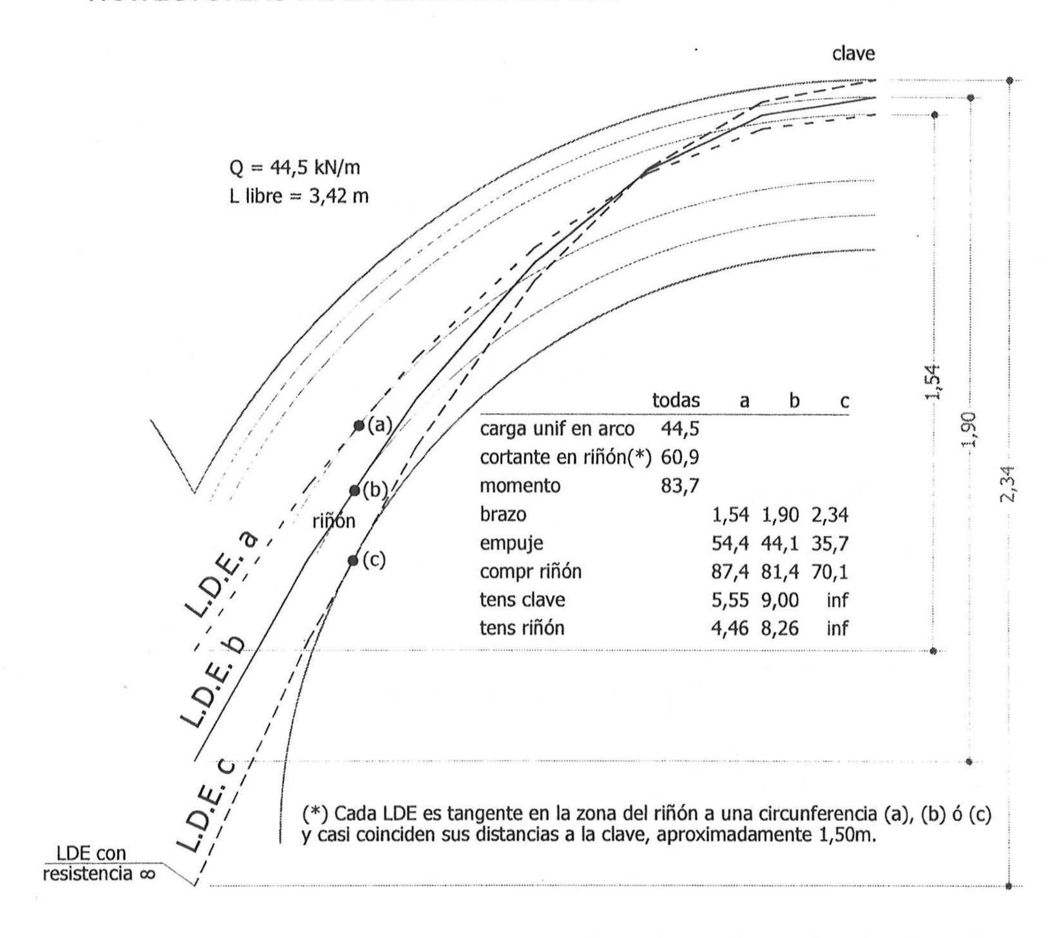
En la figura siguiente se ha dibujado medio arco y un diagrama de momentos 'LDE c' cuya escala vertical se ha elegido para que haya tangencia en clave y riñón, lo que produce tensiones infinitas en estas dos secciones. Esta línea es la de mínimo empuje, como se ha comentado antes, por alcanzarse el máximo brazo:

$$\text{Empuje} = \text{Momento} / Zc$$

Naturalmente, si se tomara otro valor de 'z' variaría la línea de empuje y variaría éste; pero fijada una altura 'z' el empuje es constante en todo el recorrido al no haber, habitualmente, fuerzas horizontales externas.

Para evitar tensiones infinitas hay que alejarse de los bordes del arco. Como la compresión va creciendo hacia el arranque, ya que en cada sección es la composición del empuje y del cortante que haya en ella, ese alejamiento debe ser mayor en los riñones que en la clave. Aquí se han dibujado dos líneas de empuje: la 'LDE b' que pasa a 5 cm en la clave y a 10 cm en el riñón y la 'LDE a' que lo hace a 10 y 20 cm, respectivamente. Estos valores son un mero tanteo, porque sólo se trata de ver que las tensiones disminuyen al disminuir la excentricidad (comparando 'LDE a' y 'LDE b') y que la línea de empuje tiene que centrarse al acercarse al arranque del arco por ir aumentando la compresión (comparando arranque y riñón en ambas LDE).

TRAYECTORIAS DE LA LÍNEA DE EMPUJE



	todas	a	b	c
carga unif en arco	44,5			
cortante en riñón(*)	60,9			
momento	83,7			
brazo		1,54	1,90	2,34
empuje		54,4	44,1	35,7
compr riñón		87,4	81,4	70,1
tens clave		5,55	9,00	inf
tens riñón		4,46	8,26	inf

La carga uniforme es de 44,5 kN/m.[5] El momento máximo es $M_{máx} = 83,7$ kN·m.[6] y dibujada la trayectoria de la LDE se mide la altura del brazo, por ejemplo para LDE b: Z_b=1,90 m. El empuje se obtiene como cociente entre momento y brazo: $E = M_{máx}/Z_b = 44,1$ kN.

La tabla de la figura muestra las variables más representativas de cada línea de empuje LDE a, LDE b y LDE c. La obtención de las tensiones se verá en el apartado 1.2.5. En los apartados que siguen se usa la 'LDE b' para obtener empujes, esfuerzos y tensiones.

1.2.3.- <u>Equilibrio local en varias secciones del arco para una línea de empuje cualquiera</u>

En la figura siguiente se han obtenido los valores numéricos de esfuerzos y tensiones en la sección de la clave, en la del riñón (Xi) y en la que la LDE cruza la directriz del arco (Xj). La sección del riñón es aquella en la que la L.D.E. pasa más cerca del intradós.

5 La carga uniforme de los 4,00 m de forjado apoyando en el arco es: 4,00 kN/m² (permanente) y 4,00 kN/m² (sobrecarga). En total, 32,00 kN/m.
La carga uniforme del muro de 1,05 m de altura y 0,49 m de espesor: 9,26 kN/m.
La carga de la enjuta suponiéndola repartida, 0,628·0,49·18/1,71 = 3,24 kN/m.

6 El momento con toda la carga uniforme es $qL^2/8 = 85,0$ kN·m y si se quita la carga de la zona de los pilares es de $q·(L-e)·L/2 - q·[(L-e)/2]^2/2 = 83,7$ kN·m. (Con q=44,5; L=3,91 y e=0,49)

INFORMACIÓN DE LA L. D. E. Y CÁLCULO DE ESFUERZOS Y TENSIONES

Vi = Q·xi = 44,5·1,51 = 67,2 kN
Q=44,5 kN/m
Vj = Q·xj = 44,5·0,90 = 40,1 kN
tens = 44,1/(49·10) = 9,00kp/cm²
F=E=n=44,1
t=0
CÁLCULO DE SECCIÓN
exc.= 0
L.D.E.
CÁLCULO DE SECCIÓN EN LA CLAVE
E=44,1
n=57,5
F=59,5
t=15,3
Vj=40,1
ancho del arco: b=49cm
tens = 57,5/(49·49) = 2,39kp/cm²
áng desliz = atg(15,3/57,5)=14,94º
CÁLCULO DE SECCIÓN EN EL RIÑÓN
0,20
E=44,1
tens = 81,4/(49·20) = 8,26kp/cm²
F=n=81,4
t=0
Vi=67,2

La dirección de la fuerza 'F' es la tangente a la línea de empuje en cada sección del arco. Esa dirección no será, en general, ortogonal a la sección, por lo que 'F' debe descomponerse en 'n' normal (compresión) y 't' tangencial. La magnitud 'F' de la sección se obtiene componiendo el empuje 'E' y el cortante 'Vi'. Esta fuerza 'F' es paralela a la directriz del arco en dos secciones: al paso por la clave y por los riñones (tensiones máximas), lo que anula las tensiones tangenciales 't' coincidiendo así 'n' y 'F' en esas secciones.

1.2.4.- Deslizamiento

El cociente 't/n' es la tangente del ángulo que forman 'F' y la perpendicular al plano de la sección, que debe ser menor que el coeficiente de rozamiento del material para que no haya deslizamiento. La sección en la que la L. D. E. corta a la directriz del arco es en la que se produce el máximo valor de 't/n' que, en este caso, es la tangente de aproximadamente 15º.[7]

7 Para que se supere el ángulo de rozamiento en un arco de edificación ante cargas uniformes se deben cumplir dos premisas: el grosor de la rosca debe ser muy elevado en relación a la luz, para que la línea de empuje pueda ganar ángulo suficiente al cruzar por la directriz desde el extradós al intradós, y el empuje admitido por el estribo debe ser muy reducido, para que la línea de empuje abarque buena parte del espesor del arco, y de este modo ese ángulo al paso por la directriz sea efectivamente grande. En arquitectura estos arcos sólo se dan en las portadas y para ver un deslizamiento entre dovelas hay que buscar causas externas además de arcos muy poco esbeltos: cargas concentradas en el entorno del cuarto de la luz o asientos de los estribos.

1.2.5.- Tensiones

La compresión 'n' produce una tensión normal al repartirla en un bloque comprimido, por ejemplo rectangular, cuya anchura 'b' (transversal al papel) es la del arco y su profundidad 'y' es el doble que la distancia entre el borde inmediato y el paso de la L.D.E. por la sección. El cociente 'n/(b·y)' es la tensión normal media, que deberá ser inferior a la resistencia del material.

En el caso de la 'LDE b', en la clave, la fuerza normal es $n = E = F = 44{,}1$ kN y la tensión de compresión $\sigma = n/(b\cdot y) = 44{,}1\cdot 100 / (49\cdot 10) = 9{,}00$ kp/cm².

En los riñones, la fuerza normal es $n = F = 81{,}4$ kN y la tensión $\sigma = n/(b\cdot y) = 81{,}4\cdot 100 / (49\cdot 20) = 8{,}26$ kp/cm².

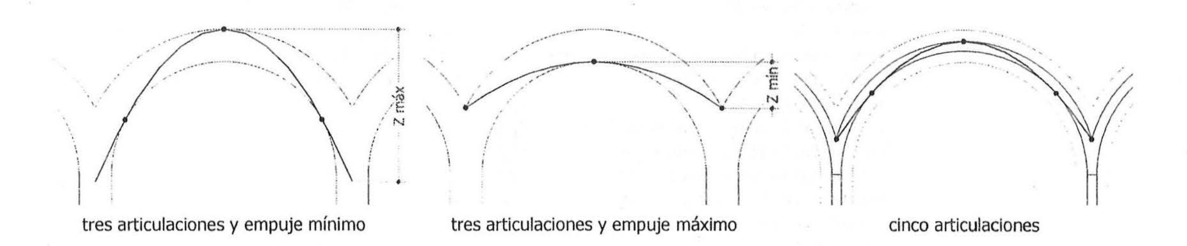
Del mismo modo se opera con el cociente 't/(b·y)' que es la tensión tangencial media, aunque ni este valor ni el deslizamiento son relevantes para carga uniforme.

1.2.6.- Línea de empuje óptima y seguridad del arco

Lo anterior corresponde a una línea de empuje cualquiera de las posibles y ha servido para ver cómo se calculan esfuerzos y tensiones en una sección. Ahora se trata de saber elegir la línea de empuje óptima: aquella que produce menor tensión que las demás.

Con tres rótulas el arco es isostático. Estos son los dos límites de líneas de empuje definidos en 1.2.1 –empuje máximo y mínimo–.[8] Con cuatro rótulas, el arco está en el límite de estabilidad o de pérdida de equilibrio. Y estas cuatro pueden ser cinco cuando todo es simétrico, ya que la cuarta y quinta aparecen, teóricamente, a la vez.

Los arcos de la figura 1.2.1, que aquí se reproducen, de material infinitamente resistente y rígido, no llegan a tener esas cinco rótulas por ser poco esbeltos, quedándose en tres. Si se adelgazaran suficientemente, como en la figura de la derecha, hasta que la parábola fuera tangente en cinco puntos, se formarían las cinco rótulas límite de estabilidad cuando hay simetría.



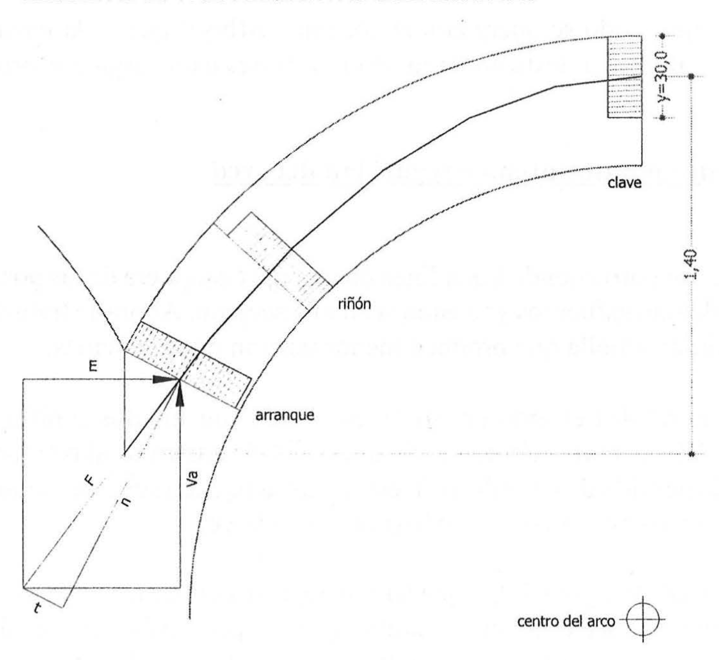
8 Una rótula se produce en una zona de material –una serie de secciones consecutivas– donde las tensiones son tan elevadas que se supera el límite elástico y se produce un aplastamiento local. Las tensiones son elevadas cuando la línea de empuje pasa cercana al borde del arco. El aplastamiento de uno de los dos bordes en una serie consecutiva de secciones del arco supone un giro local notable. Esto es la rótula.

En una arcada de ladrillo el parámetro crítico es la resistencia. Según la línea de empuje se vaya acercando a los bordes las tensiones crecen sin poder, ni con mucho, llegar a ser tangentes. Luego, en casos simétricos, la línea de empuje óptima se elige para que a su paso por esas cinco secciones, clave, dos riñones y dos arranques, produzca la misma tensión en todas ellas, ya que esta igualdad colectiva es la condición para que la tensión sea menor que la que se obtendría con cualquier otra línea de empuje. Alcanzado el objetivo de igualar tensiones en cinco secciones, esa es la línea de empuje óptima.(9)

En la figura siguiente se muestra el resultado de este procedimiento y los resultados numéricos para distintas sobrecargas en el arco que se está tomando como ejemplo.(10)

La seguridad de un arco de ladrillo, si el empuje no es crítico, es la relación entre la resistencia de la fábrica y la tensión alcanzada con esta línea de empuje óptima, o sea, el cociente '$f / \sigma_{mín}$' mide la seguridad.

RESULTADOS PARA DISTINTAS SOBRECARGAS



	comunes	particulares para cada sobrec.		
sobrecarga de uso (kN/m²)		2	3	4
carga total uniforme (kN/m)		36,5	40,5	44,5
momento (kN·m)		68,7	76,2	83,7
cortante en apoyo (kN)		62,4	69,3	76,1
empuje (kN)		49,1	54,5	59,9
tensión normal en las 3 secc críticas (kp/cm²)		3,39	3,76	4,13
tensión normal en el salmer		6,19	6,84	7,49
ángulo máx de desliz. (º)	8,75			
profundidad del bloque en arranque (cm)	47,0			
profundidad del bloque en riñón (cm)	44,0			
profundidad del bloque en clave (cm)	30,0			
cota arranque LDE a centro arco (m)	0,65			
brazo de palanca z (m)	1,40			
escala vertical		2,04	1,84	1,67

9 Este proceso es conveniente realizarlo por iteración con una hoja de cálculo en la que el arco sea troceado en un número amplio de 'dovelas' variando la escala vertical de la línea de empuje y su origen, y calculando cada vez las tensiones en todas las secciones hasta ir alcanzando el objetivo de igualdad propuesto.

10 La trayectoria es la misma para todos los casos que tengan la misma geometría.

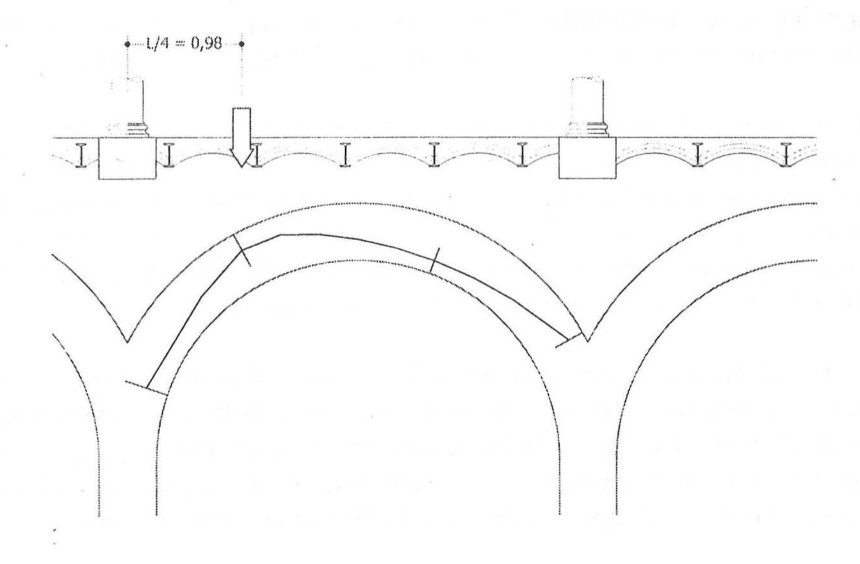
1.3.- CARGAS CONCENTRADAS EN LOS ARCOS

Un arco sometido a carga no simétrica se desestabiliza cuando se forma la cuarta rótula. Si el material tuviera resistencia infinita, la L.D.E. pasaría tangente al arco, pero como el ladrillo tiene una resistencia reducida, hay que trazar una línea de empuje que produzca tensiones iguales en cuatro secciones que, como antes, es la condición que define la línea de empuje óptima.[11]

En la figura se muestra el resultado de aplicar, en el arco del ejemplo, una carga concentrada de 50 ó 100 ó 150 kN al cuarto de la luz. Esta carga se ha aplicado concentrada pero se podría haber distribuido en un cálculo más afinado, ya que se entiende aplicada en la cota superior del forjado y el ladrillo abriría esa carga en un abanico de bielas con un ángulo de unos 60° con la horizontal. También hay aplicada una sobrecarga general de 3,00 kN/m². En la tabla de la figura se incluyen las magnitudes de las fuerzas y las tensiones resultantes.[12]

CAPACIDAD DE LA ARCADA PARA CARGAS CONCENTRADAS

carga concentrada a L/4 (kN)	50	100	150
momento (kN·m)	103	133	167
cortante en apoyo inmediato (kN)	107	144	182
empuje (kN)	84,4	110	133
tensión en las 4 rótulas (kp/cm²)	6,16	9,58	13,5
ángulo máximo de deslizamiento (°)	14,2	19,9	25,9
cota de centro arco a izqda de LDE (m)	0,617	0,524	0,449
cota de nudo izqdo LDE a drcho LDE (m)	0,218	0,426	0,568
escala de LDE respecto a M	1,185	0,910	0,751



11 El proceso iterativo anterior es aquí más engorroso porque la línea de empuje además tienen un tercer parámetro además de la escala vertical y la cota del origen: la diferente altura del origen de los dos extremos.

12 La carga concentrada produce distintos efectos según la sección en que se aplique y de su relación con la carga uniforme. Para los valores que se estudian aquí, aplicarla al cuarto de la luz produce los esfuerzos más desfavorables. Para más detalle, véase, por ejemplo, *Santiago Huerta "Arcos, bóvedas y cúpulas" IJH 2004pág 83-84.*

1.4.- ALTERNANCIA DE SOBRECARGAS

La alternancia de sobrecarga supone una diferencia de empuje entre arcos adyacentes pero no aumentan las tensiones de sus roscas ya que en el arco cargado son las mismas que si no hubiera alternancia, mientras que disminuyen en el descargado.

La diferencia de empuje no es un valor fijo sino ajustable y consecuentemente tiene un mínimo. Éste puede regularse, por ejemplo, por la condición de que no se superen las tensiones obtenidas del cálculo con todos los vanos cargados, tanto en la rosca como en el salmer.

Este ajuste se realiza variando dos parámetros: el canto 'z' de la línea de empuje de vanos cargados y descargados, y la luz de la línea de empuje (luz mecánica) respecto de la luz geométrica del arco, aumentando la luz de los vanos descargados y disminuyendo la de los cargados. El brazo 'z' puede disminuir en el arco descargado hacia la posición de empuje máximo quedando situado en aquella cota en la que se iguale la tensión de compresión del arco cargado en el intradós de la clave y el extradós de los arranques. La luz mecánica también puede variar respecto de la distancia entre ejes de pilares aprovechando el grueso de estos. Aumentando la del vano descargado y disminuyendo, en la misma cantidad, la del cargado.

Este juego sólo tiene un punto intocable, salvo estudio especial del nudo, y es que los arranques de las líneas de empuje cargada y descargada deben coincidir en el apoyo para que no haya empuje al vacío.

Por otra parte, ese cambio de luces tiene un límite: la excentricidad de la compresión que admita la cabeza del pilar para que no se supere la tensión centrada con carga total en el salmer; compresión que es menor que la máxima, al tener sobrecarga sólo en uno de los arcos adyacentes. De modo que hay una adaptabilidad de la arcada para aceptar la alternancia de sobrecargas mitigando los empujes diferenciales sin que aumenten las tensiones en arcos y salmeres.

Este es, pues, el procedimiento para determinar la mínima diferencia de empuje entre arcos cargados y descargados si se toma como base de partida el no superar las tensiones con todos los vanos cargados: tender la línea de empuje del vano descargado hasta igualar la tensión del cargado, lo que reduce el brazo de palanca 'z' y aumentar la luz del descargado hasta que la tensión del salmer producida por la compresión excéntrica sin sobrecarga en un vano se iguale a la tensión del salmer producida por la compresión total centrada.

Hay una cuestión que repercute en la durabilidad, si la frecuencia de variación de las sobrecargas es alta, o si los morteros son rígidos, o si los ladrillos son blandos, o si la relación entre la magnitud de la sobrecarga y de la carga permanente es grande. Porque, con la variación de carga entre vanos, la línea de empuje sube y baja constantemente, produciendo compresiones y descompresiones en los arcos que afectan a la estabilidad de los morteros o de la fábrica.

Naturalmente, si el pilar admite la diferencia de empuje máxima obtenida de un cálculo simple inicial, no hay nada que ajustar y todo lo anterior no es necesario.

1.5.- ESTUDIO DEL SALMER

En el salmer se concentran los pesos de los arcos adyacentes, el de las partes del pórtico y forjado situadas en su vertical y, si hubiera plantas encima, el del normal superior. Por tanto, la tensión en el salmer puede ser la variable crítica, aunque la capacidad resistente puede mejorar algo gracias a la compresión biaxial que genera el empuje. Esto motiva que en muchos edificios esta zona, y el mismo soporte, sean de piedra.

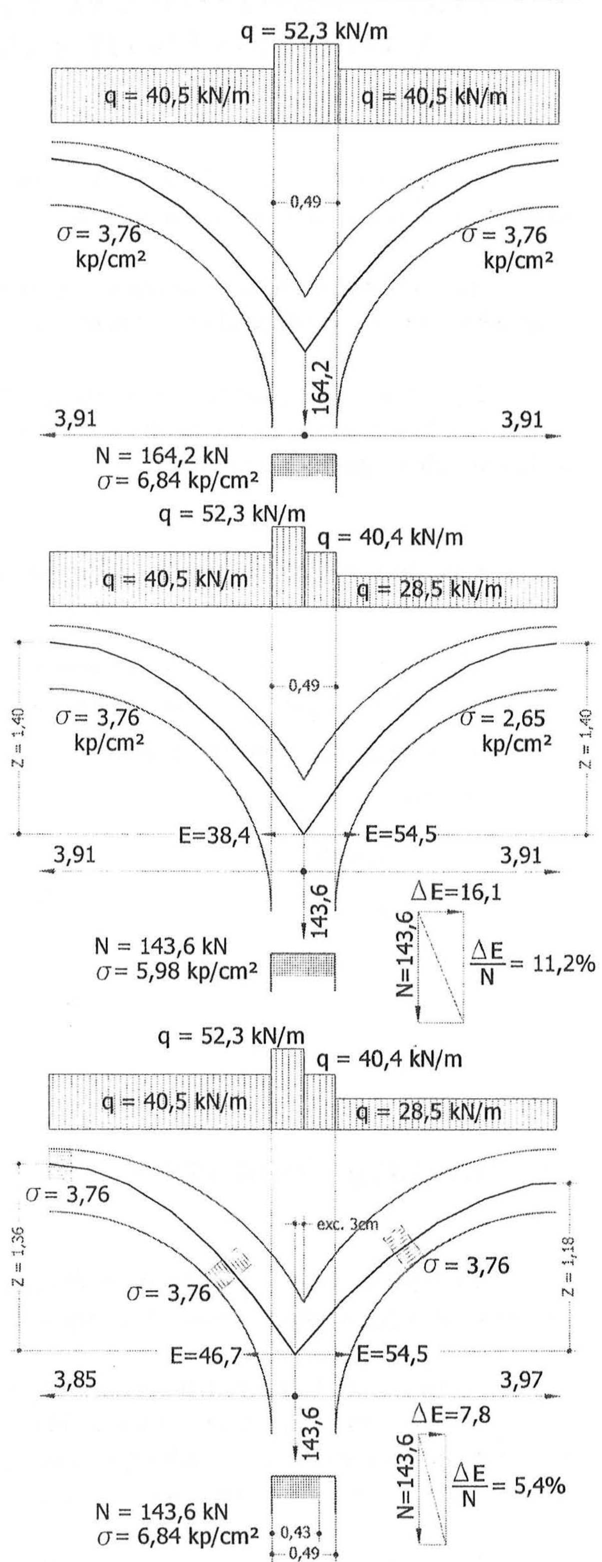
En las figuras se representa gráficamente el procedimiento y los valores obtenidos en el nudo del ejemplo usado en este capítulo.

La superior muestra los esfuerzos resultantes de aplicar toda la sobrecarga y las dos siguientes para una alternancia de sobrecarga de 3,0 kN/m².

La intermedia supone que la carga está centrada sobre el pilar. En el arco cargado se obtiene la línea de empuje óptima (σ=3,76) y su cota de paso por el eje del pilar. Con el arco descargado se procede igual pero fijando su línea de empuje óptima para que pase por la cota anterior (σ=2,65). Con ambas, se conoce de forma sencilla una diferencia de empuje. Si ésta fuera grande, se puede reducir, siguiendo la figura inferior.

La última figura plantea un bloque comprimido con la tensión máxima del salmer (σ=6,84), por lo que ocupa menos ancho al tener menos carga, y su excentricidad varia las luces mecánicas de los dos arcos. Se calcula el vano cargado igual que antes, se fija la cota de paso por el apoyo y se calcula el vano descargado eligiendo una línea más tendida para que el empuje aumente y se aproxime al del vano cargado. Esto hace crecer la tensión que queda limitada a la del vano cargado.





2

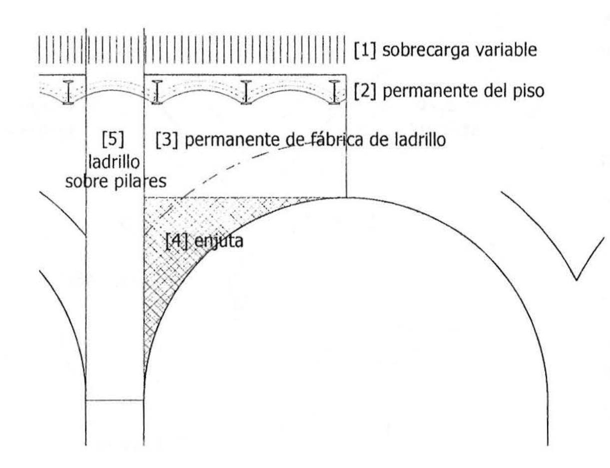
PROTUARIO PARA EL CÁLCULO DE ARCADAS DE LADRILLO EN OBRAS DE REHABILITACIÓN

En este capítulo se indican las tensiones, ángulos de incidencia y empujes de arcadas, a partir de su dimensión y peso. La información se presenta gráficamente.

Se estudia una gama de dimensiones frecuentes en las obras de estas características y tres tipos de carga: total, alternada y concentrada a una distancia del cuarto de la luz del arco.

Se obtiene el empuje total del extremo de la arcada y el diferencial en pilares intermedios causado por alternancias; la tensión máxima en la rosca del arco y del salmer, y el mayor ángulo de la línea de empuje con la directriz.

<u>Cuestión previa sobre las cargas aplicadas en el arco</u>



El grueso de los pilares en estas obras suele ser un porcentaje importante de la longitud del módulo de la arcada. Como el peso que recae directamente en ellos no produce flexión, ya que baja directamente por la pilastra sin hacer trabajar al arco,(13) en los cálculos que siguen se ha deducido el peso de la altura de la fábrica situada entre salmer y forjado, y de éste, la carga permanente y sobrecarga aplicadas en el ancho de pilar (la zona [5] de la figura). Naturalmente, para evaluar el salmer no se ha eliminado.

2.1.- EVALUACIÓN DE PESOS

Un dato de partida para usar los ábacos es la dimensión de la arcada, y el otro, la carga uniforme ‘q’ (permanente y variable). Aquí se evalúa este peso del forjado y del pórtico.

El peso del forjado depende de la luz de sus vanos y de si estos son continuos o independientes. Su valor total es la suma del peso propio, solado, posible tabiquería y sobrecarga de uso. Es probable que en forjados antiguos, que no suelen venir reflejados en la normativa de acciones, haya que estimar su peso propio con la geometría y peso específico de los materiales.

El peso de la arcada incluye la fábrica situada entre cara superior de forjado y cara inferior de clave del arco ([3] en la figura) y las enjutas o triángulos curvilíneos situados entre el

13 El modulo de la arcada o pórtico es lo contenido entre dos ejes de pilares.

forjado y el intradós del arco. El peso de estos triángulos se distribuirá a lo largo de la luz, ya que esta simplificación no altera significativamente el resultado, como se vio en el capítulo anterior.

La tabla siguiente indica el peso de servicio, por unidad de longitud, desde 2,5 a 5,5 m de luz 'L' libre del arco; entre 0,50 y 1,25 m de altura 'h' de fábrica en clave; de 2,5 a 5,5 m de longitud 'S' de forjado que apoya en la arcada (cuyo peso permanente G varía de 3 y 5 kN/m² y cuya sobrecarga Q, entre 2 y 5 kN/m²). El peso específico del material de la arcada es 18 kN/m³.

	18 kN/m³		h altura de intradós clave a cara superior de forjado						
	L libre	anch b	**0,500**	**0,625**	**0,750**	**0,875**	**1,000**	**1,125**	**1,250**
pesos de la arcada	**2,5**	*0,250*	3,46	4,02	4,58	5,14	5,71	6,27	6,83
		0,300	4,15	4,82	5,50	6,17	6,85	7,52	8,20
		0,375	5,19	6,03	6,87	7,72	8,56	9,40	10,25
		0,500	6,91	8,04	9,16	10,29	11,41	12,54	13,66
	3,0	*0,250*	3,70	4,26	4,82	5,39	5,95	6,51	7,07
		0,300	4,44	5,11	5,79	6,46	7,14	7,81	8,49
		0,375	5,55	6,39	7,24	8,08	8,92	9,77	10,61
		0,500	7,40	8,52	9,65	10,77	11,90	13,02	14,15
	3,5	*0,300*	4,73	5,40	6,08	6,75	7,43	8,10	8,78
		0,375	5,91	6,75	7,60	8,44	9,28	10,13	10,97
		0,500	7,88	9,00	10,13	11,25	12,38	13,50	14,63
		0,625	9,85	11,26	12,66	14,07	15,47	16,88	18,29
	4,0	*0,375*	6,27	7,12	7,96	8,80	9,65	10,49	11,33
		0,450	7,53	8,54	9,55	10,56	11,58	12,59	13,60
		0,500	8,36	9,49	10,61	11,74	12,86	13,99	15,11
		0,625	10,45	11,86	13,27	14,67	16,08	17,48	18,89
	4,5	*0,300*	5,31	5,98	6,66	7,33	8,01	8,68	9,36
		0,500	8,85	9,97	11,10	12,22	13,35	14,47	15,60
		0,625	11,06	12,46	13,87	15,28	16,68	18,09	19,49
		0,750	13,27	14,96	16,64	18,33	20,02	21,71	23,39
	5,0	*0,375*	7,00	7,84	8,68	9,53	10,37	11,22	12,06
		0,500	9,33	10,45	11,58	12,70	13,83	14,95	16,08
		0,625	11,66	13,07	14,47	15,88	17,29	18,69	20,10
		0,750	13,99	15,68	17,37	19,06	20,74	22,43	24,12
	5,5	*0,375*	7,36	8,20	9,05	9,89	10,73	11,58	12,42
		0,500	9,81	10,94	12,06	13,19	14,31	15,44	16,56
		0,625	12,26	13,67	15,08	16,48	17,89	19,30	20,70
		0,750	14,72	16,40	18,09	19,78	21,47	23,15	24,84

pesos del forjado	**2,00**	**3,00**	12,50	15,00	17,50	20,00	22,50	25,00	27,50
		4,00	15,00	18,00	21,00	24,00	27,00	30,00	33,00
		5,00	17,50	21,00	24,50	28,00	31,50	35,00	38,50
	3,00	**3,00**	15,00	18,00	21,00	24,00	27,00	30,00	33,00
		4,00	17,50	21,00	24,50	28,00	31,50	35,00	38,50
		5,00	20,00	24,00	28,00	32,00	36,00	40,00	44,00
	4,00	**3,00**	17,50	21,00	24,50	28,00	31,50	35,00	38,50
		4,00	20,00	24,00	28,00	32,00	36,00	40,00	44,00
		5,00	22,50	27,00	31,50	36,00	40,50	45,00	49,50
	5,00	**3,00**	20,00	24,00	28,00	32,00	36,00	40,00	44,00
		4,00	22,50	27,00	31,50	36,00	40,50	45,00	49,50
		5,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00	55,00
	Q	**G**	**2,50**	**3,00**	**3,50**	**4,00**	**4,50**	**5,00**	**5,50**
	sobrec	perman	S longitud de forjado que apoya en la arcada						

Para cualquier otro valor se puede interpolar y extrapolar linealmente.

2.2- TENSIÓN, ROZAMIENTO Y EMPUJE EN ARCADAS DE LUCES IGUALES

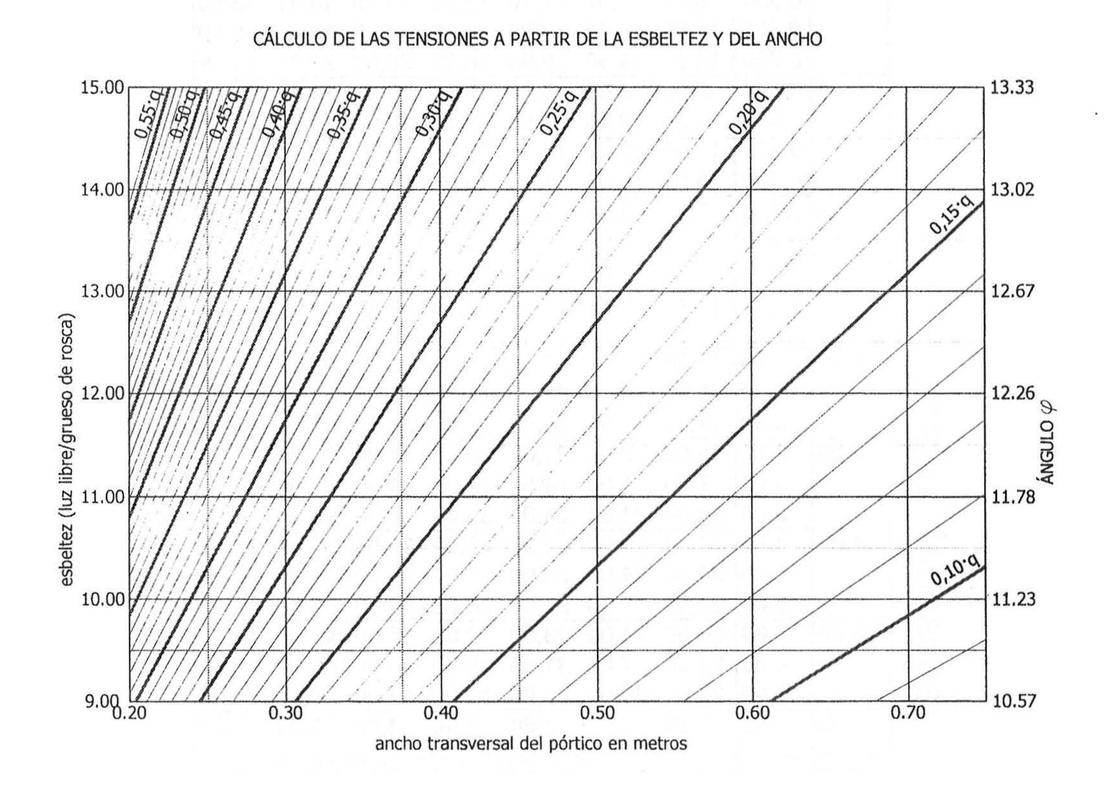
La rehabilitación en este tipo de edificios, generalmente públicos, suele llevar implícito un cambio de uso, con el consiguiente aumento de sobrecarga. Puede también suponer un aumento de pesos permanentes por cambio de solados, inclusión de instalaciones, aislamientos y sustitución o refuerzo de forjados. Lo que acarrea un aumento de tensiones.

Todos estos cambios no alteran, lógicamente, la forma de la arcada (ancho, luz o grueso de rosca −esbeltez−) por lo que las tensiones y los empujes varían sólo según lo haga el peso. El ángulo de la línea de empuje con la directriz del arco varía sólo con la esbeltez (para carga uniforme, que es la estudiada ahora).

Este ábaco indica la tensión en la rosca del arco para el caso de línea de empuje óptima, o sea, aquella que discurre con menos excentricidad. Es aplicable tanto para conocer la tensión producida por una carga uniforme como para conocer el aumento de tensión al hacerlo la carga.

En la escala de la derecha se indica el máximo ángulo que forma la línea de empuje con la directriz, pues varía sólo con la esbeltez. Tal ángulo no es problemático con carga uniforme, pero se usará como dato para determinar el ángulo de incidencia cuando haya cargas concentradas.

La esbeltez es aquí el cociente entre luz libre y grueso de rosca del arco[14]. El ancho del pórtico está expresado en metros, la carga uniforme 'q' en kN/m y la tensión en kN/cm².[15]



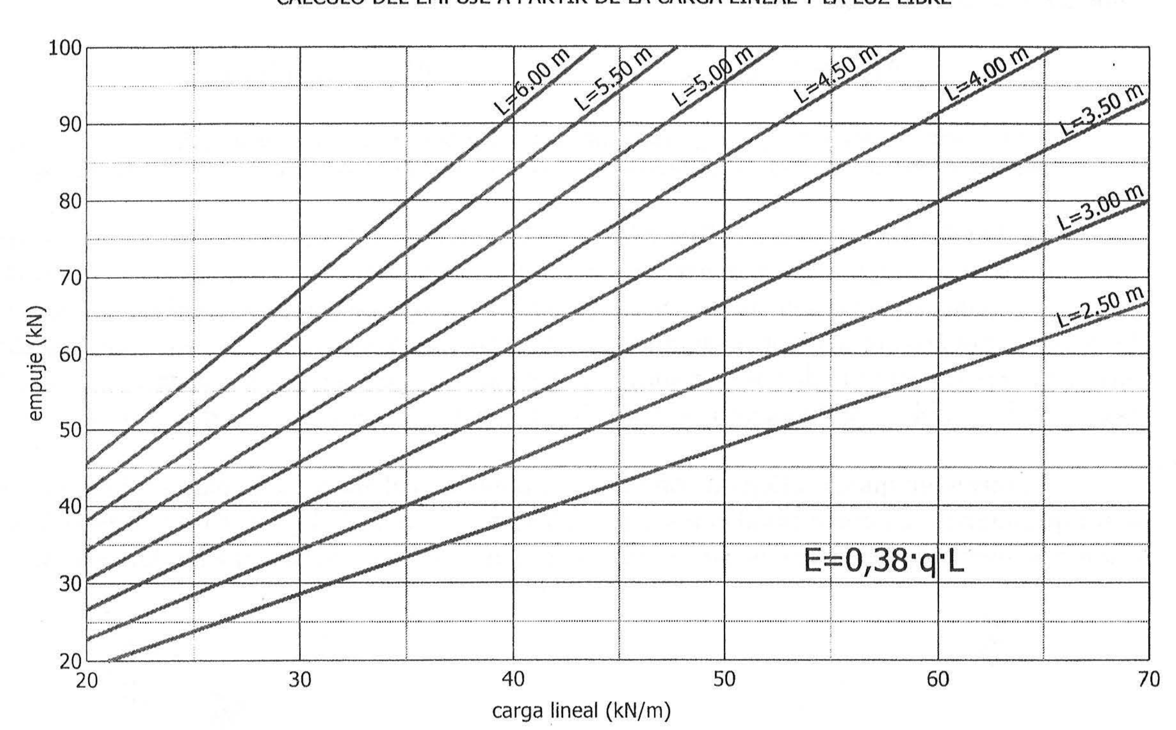
14 Se ha usado la luz libre porque es la más fácil de medir que la luz a ejes y, más aun, que la luz mecánica.

15 Por brevedad, a la suma de todas las acciones gravitatorias G y P se la denomina q a lo largo de este trabajo

En cuanto al empuje, si cargas y luces fueran iguales, se contrarrestaría entre arcos contiguos, mientras que en los extremos vale:

$$E = 0{,}38 \cdot (G+Q) \cdot L_{libre} \qquad \{2.2\}$$

Esta expresión se desarrolla en el ábaco siguiente. Cuando se estudie la alternancia de sobrecarga en el siguiente apartado, el empuje desequilibrado en los pilares intermedios se presentará como un porcentaje de este valor.



2.3.- ALTERNANCIA DE SOBRECARGA

La alternancia de sobrecarga produce desequilibrio de empuje en los pilares que es mayor o menor según la línea de empuje usada. El criterio para elegirla se basará en seguir la hipótesis general de este trabajo, que es la de alcanzar, en cada caso, la tensión mínima.

Una vez obtenida la línea de empuje óptima en el vano cargado, que es la de empuje mínimo que produzca menores tensiones en la rosca, se conocen los límites de las tensiones del arco σ_{arco} y del salmer σ_{salmer}. La de éste, repartiendo el peso del módulo cargado en todo el pilar. Estas tensiones serán los límites superiores para elegir las líneas de empuje del vano descargado, lo que da lugar a tres casos que producen tres valores para el empuje desequilibrado.

Naturalmente, el menor de ellos es el más adecuado, pero también requiere un cálculo más largo. Mientras se use un ábaco, el tiempo consumido por el usuario es similar, pero se incluyen todos para comparar sus diferencias y para permitir, a quien realice un cálculo sin esa ayuda, poder realizar sólo el caso más sencillo y orientarse en la extrapolación.

Criterios de cálculo

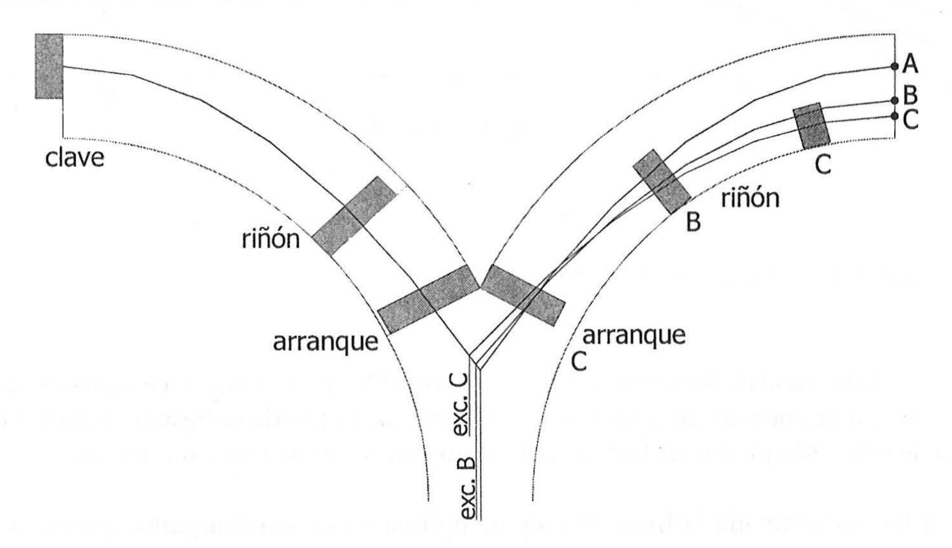
CASO A. Es el más sencillo, pues basta aplicar los ábacos del apartado 2.2 para obtener tensiones y empujes del vano cargado y descargado. Se resume en que las dos líneas de empuje son iguales pues lo que cambia es el esfuerzo y la tensión, ambos proporcionales a la carga aplicada en cada vano. Por tanto, ambas coinciden en el eje del pilar. Su resultado se representa en el ábaco de la página siguiente como línea de trazos. A partir de {2.2} el empuje de la sobrecarga resulta, en términos absolutos y relativos:

$$\Delta E = 0{,}38 \cdot q_{sobrecarga} \cdot L_{libre} \quad \text{y} \quad \Delta E/E = Q/(G+Q)$$

(*) En términos absolutos, $q_{sobrecarga}$ es la sobrecarga aplicada en la arcada por unidad de longitud, mientras que en términos relativos Q y G (sobrecargas y pesos permanentes) sólo tienen que ser homogéneos.

CASO B: Corresponde a la figura inferior del apartado 1.5. Al no haber sobrecarga en un vano, el peso disminuye y permite mantener la tensión del salmer σ_{salmer} ocupando sólo parte del pilar y definiendo con ello una excentricidad que ladea el apoyo mecánico hacia el arco cargado y trunca en ese nuevo eje su línea de empuje, que es la misma que en el caso A (porque óptima sólo hay una). Desde ese punto de corte arrancará la línea de empuje del vano descargado, que será la más tendida posible, acercándose al intradós hasta alcanzar la tensión σ_{arco} en el riñón.

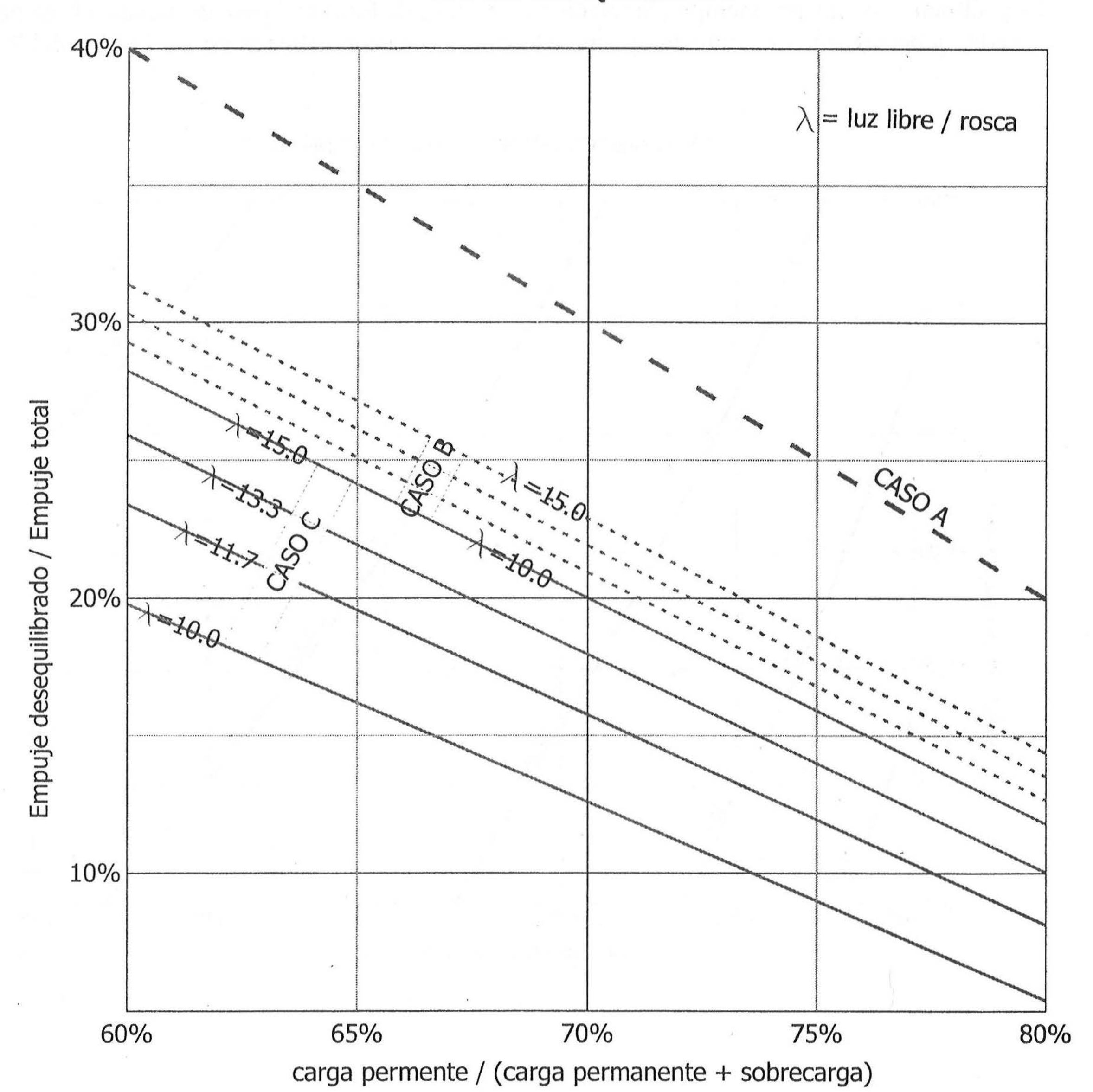
El resultado queda reflejado con líneas de puntos en el ábaco de la página siguiente. Se han representado las correspondientes a las esbelteces 10,0 11,7 13,3 y 15,0 y suponen una reducción media del empuje desequilibrado del orden de un 25 – 35% respecto del caso A.



CASO C: Se puede aumentar la excentricidad pero a costa de aumentar la tensión en el salmer por encima de su valor inicial. Naturalmente, esta situación sólo es posible cuando la resistencia del ladrillo lo permita o cuando el salmer sea de material más resistente.

En este caso, se traza la línea de máximo empuje en el vano descargado, o sea, la más tendida posible, lo que queda limitado por la tensión σ_{arco}. Por tanto, se acerca al intradós en los riñones y al extradós en los arranques, lo que la eleva respecto a la obtenida en B y se cortará con la línea de empuje del arco cargado más al borde del pilar, con una mayor excentricidad. Y, con ésta, se determina la profundidad del bloque del pilar y el nuevo valor de σ'_{salmer}.

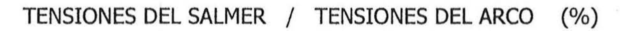
El resultado se representa en el ábaco con líneas continuas, usando las mismas esbelteces que antes. Orientativamente, la variación con respecto al caso B supone las siguientes parejas de valores que corresponden respectivamente a las esbelteces extremas 15 y 10: el desequilibrio de empuje se reduce un 15 – 30 %, la excentricidad aumenta 1,5 – 2,5 veces y las tensiones en el salmer suben un 10 – 40%.

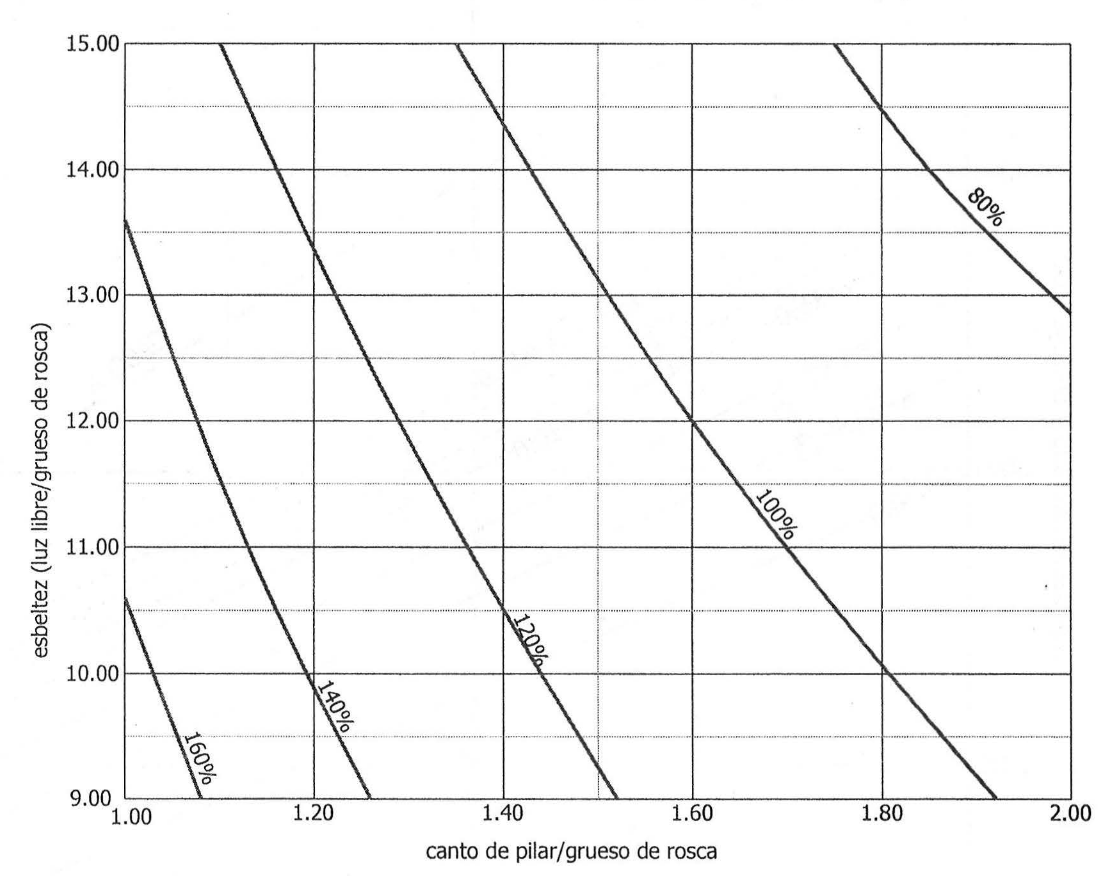


De los distintos parámetros que intervienen en el cálculo, sólo quedan reflejados en el este ábaco la esbeltez y la relación entre carga permanente o total. Ninguno de los demás interviene, salvo el ancho de los pilares en relación a la luz del módulo, que mueve algo los resultados de empuje indicados. La relación representada es la de pilar/módulo = 1/10. Para valores de ancho doble de pilar (pilar/módulo =1/5) el empuje obtenido se reduce al 94% y para valores de ancho mitad (pilar/módulo =1/20), aumenta al 106%. Sin casi influencia de la esbeltez.

2.4.- TENSIÓN EN EL SALMER

El siguiente ábaco indica la relación entre las tensiones en el salmer y en la rosca del arco (en %), siempre para luces y cargas iguales en todos los vanos. Este valor depende de la esbeltez y de la relación entre gruesos de pilar y rosca de arco y es prácticamente independiente del resto de parámetros como, por ejemplo, la relación entre peso de forjado y peso de arcada o la de peso variable y permanente o el tamaño, ya que el error de esta simplificación es del orden del 3%.





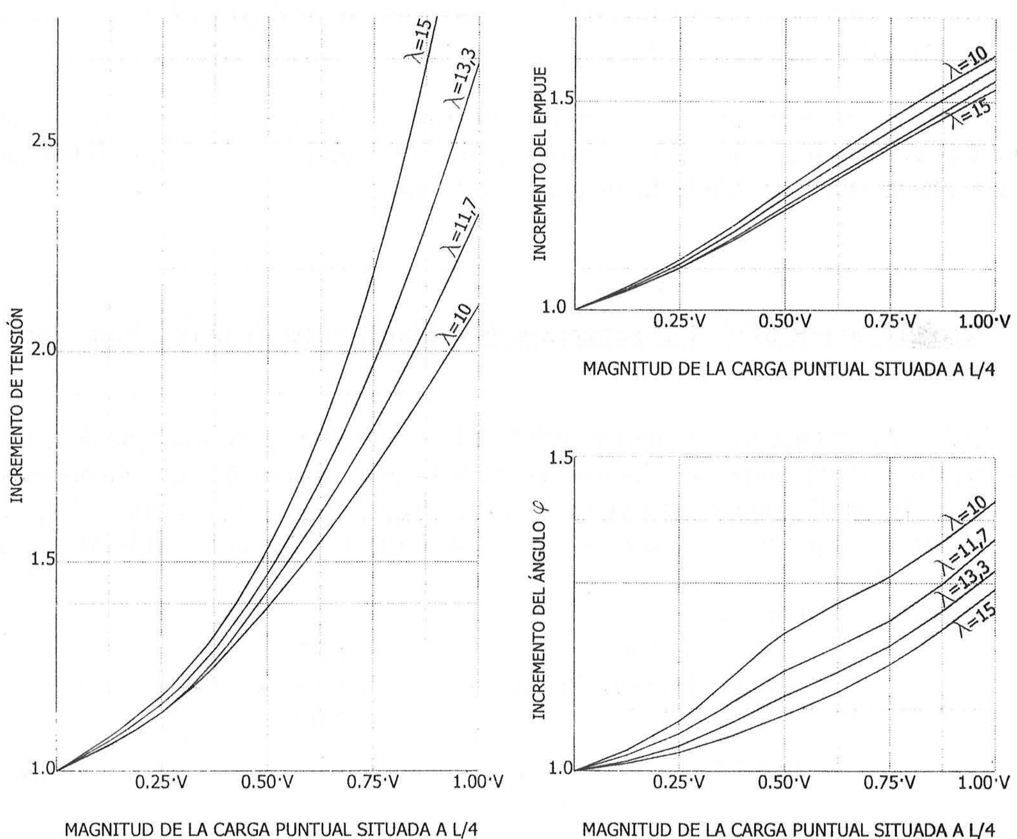
2.5.- CARGAS CONCENTRADAS

..

Aquí se valoran tensiones, empujes y ángulos de incidencia de un arco al aplicarle, además de la carga uniforme, con una carga concentrada situada en el cuarto de la luz. Los valores se expresan con respecto a lo obtenido en 2.2 para la carga y sobrecarga uniforme.

En cuanto a la geometría, estos incrementos son función exclusivamente de la esbeltez del arco (siempre como cociente entre la luz libre y la rosca del arco) y, en cuanto a los pesos, de la relación entre la carga concentrada y la total. Esta relación se introduce en los ábacos en función del cortante del vano, o sea

$$V_{vano} = [(\Sigma \text{ cargas y sobrecargas}) \cdot L_{libre}] / 2$$



2.6 EJEMPLO DE USO DE LOS ÁBACOS

Para aclarar el uso de los ábacos anteriores, en este apartado se aplican sobre un ejemplo de arcada de un edificio de viviendas que va a ser rehabilitado para uso público.

En todos los casos se ha realizado el cálculo manual para comparar con el resultado obtenido en los ábacos y poder añadir el orden de error del ábaco.

Descripción de la geometría

Arcada con luz libre de 3,15 m; canto de pilar y ancho de pórtico, 45 cm; grueso de rosca, 30 cm; altura de fábrica entre intradós de clave y cara superior de forjado, 1,00 m, y longitud de forjado que apoya en la arcada, 4,00 m.

En la rehabilitación se va a construir un elemento de división, paralelo a las viguetas del forjado, formado por medio pie de ladrillo perforado, enfoscado y enlucido por ambas caras, de 3,50 m de altura a un cuarto de la luz de uno de los arcos.

Peso previo por unidad de superficie de la planta antes de la rehabilitación

El forjado está hecho con viguetas IPN140, bovedilla de ladrillo y relleno de senos hasta enrasar las viguetas. El solado se construyó de baldosas hidráulicas sobre un relleno de asiento. La tabiquería de distribución de las viviendas supone una sobrecarga un poco más elevada que la habitualmente usada por tener la planta superior una altura mayor a la de edificios actuales.

Forjado	1,50	kN/m²		
Solado y relleno	1,20	"		
Tabiquería altura 3,60 m	1,30	"		
Uso	2,00	"		
TOTAL			6,00	kN/m²

Peso previo por unidad de superficie de la planta posterior a la rehabilitación

El forjado se refuerza con una capa de compresión de 4 cm, que ocupará parte del espesor de los rellenos originales, de hormigón armado y conectada a las viguetas metálicas originales, el solado será ligero y con menos relleno, la tabiquería será de paneles modulares móviles, tendrá instalaciones colgadas y falso techo. La sobrecarga de uso público completa los pesos.

	Forjado original	1,50	kN/m²		
	Refuerzo capa compresión	1,00	"		
	Solado	0,50	"		
	Mamparas tabiquería	0,60	"		
	Instalaciones y falso techo	0,40	"		
Uso		4,00	"		
TOTAL				8,00	kN/m²

Peso propio de la arcada

El peso propio de la arcada se obtiene interpolando en la tabla del apartado 2.1 la luz de 3,15 entre las luces de 3,00 y 3,50 m y tomando los valores de ancho de pórtico de 0,30 m multiplicados por 1,50 ya que no está explícita la anchura de 0,45 m. La altura de la fábrica sobre los arcos es de 1,00 m:

Luz	ancho	peso para 1,00 m de muro	interpolación · 1,50
3,00	0,30	7,14	
3,50	0,30	7,43	7,23 · 1,50 = 10,84 kN/m

Peso del separador de medio pie perpendicular a la arcada

Sobre la arcada apoyan 4,00 m de longitud de cerramiento transversal a ella, de 15 cm de espesor total, 3,50 m de altura y peso específico de 15 kN/m^3. El peso es:

$$4{,}00 \cdot 0{,}15 \cdot 3{,}50 \cdot 15{,}00 = 31{,}50 \text{ kN}$$

Pesos totales por unidad de longitud sobre la arcada

El peso debido al forjado se obtiene multiplicando los pesos por unidad de superficie por la longitud de forjado que apoya en la arcada, que es 4,00 m. A es magnitud se le suma el peso lineal de la arcada.

PREVIO A LA REHABILITACIÓN

Peso total de la arcada para uso de viviendas

10,84 + 4,00 · 6,00 = 34,84 kN/m

POSTERIOR A LA REHABILITACIÓN

Peso total de la arcada para uso público

10,84 + 4,00 · 8,00 = 42,84 kN/m

VALORES AUXILIARES TRAS LA REHABILITACIÓN

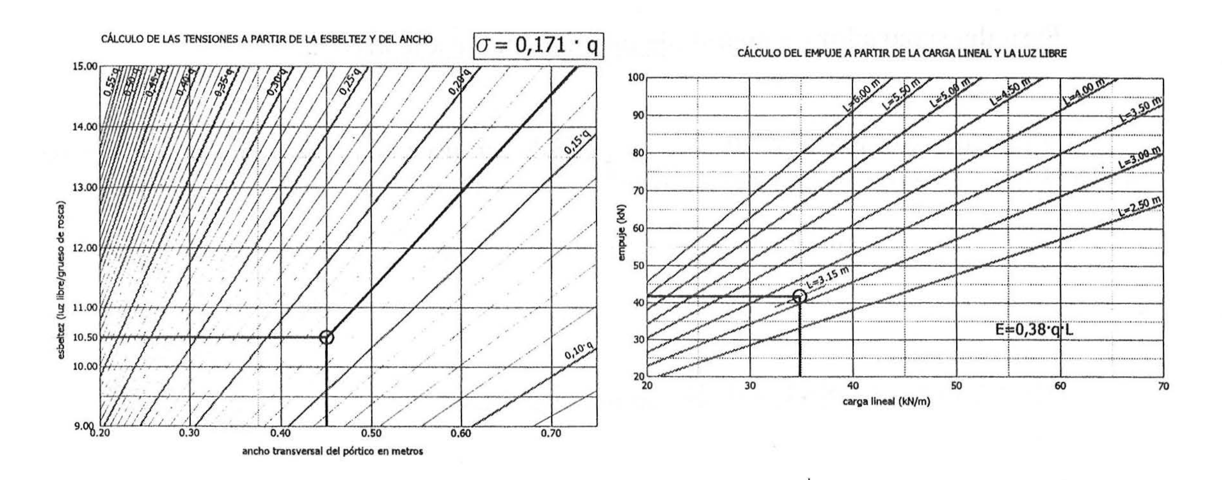
Como ayuda para el uso de los ábacos se indican las siguientes relaciones:

Peso total permanente	26,84 kN/m
Relación entre peso permanente y peso total	0,627
Cortante de la carga uniforme 42,84·3,15/2 =	67,47 kN
Relación entre peso concentrado y cortante	0,467

Tensiones y empujes en el uso anterior de viviendas

	Calculado	ábacos	ud	error del ábaco
Carga total q	34,8	34,8	kN/m	0 %
Tensión en las roscas	5,78	5,96	kp/cm²	3 %
Tensión en el salmer (*)	6,42	6,91	"	8 %
Empuje en extremos	41,4	41,7	kN	1 %
Ángulo de incidencia	11,5 º	11,5º		0 %

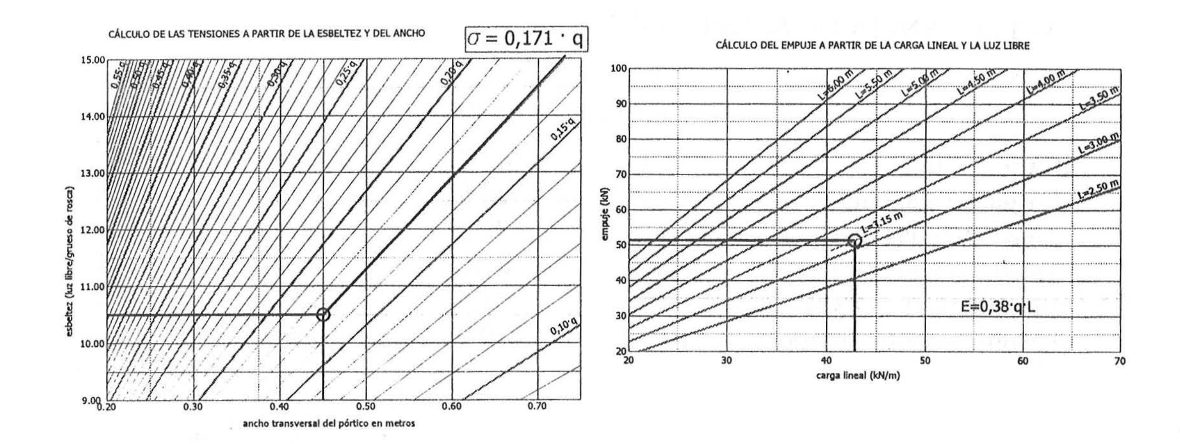
(*) El ábaco para obtener la tensión del salmer se ha incluido en la última página, por razones exclusivamente de ajuste de texto.



Tensiones y empujes en el uso posterior público

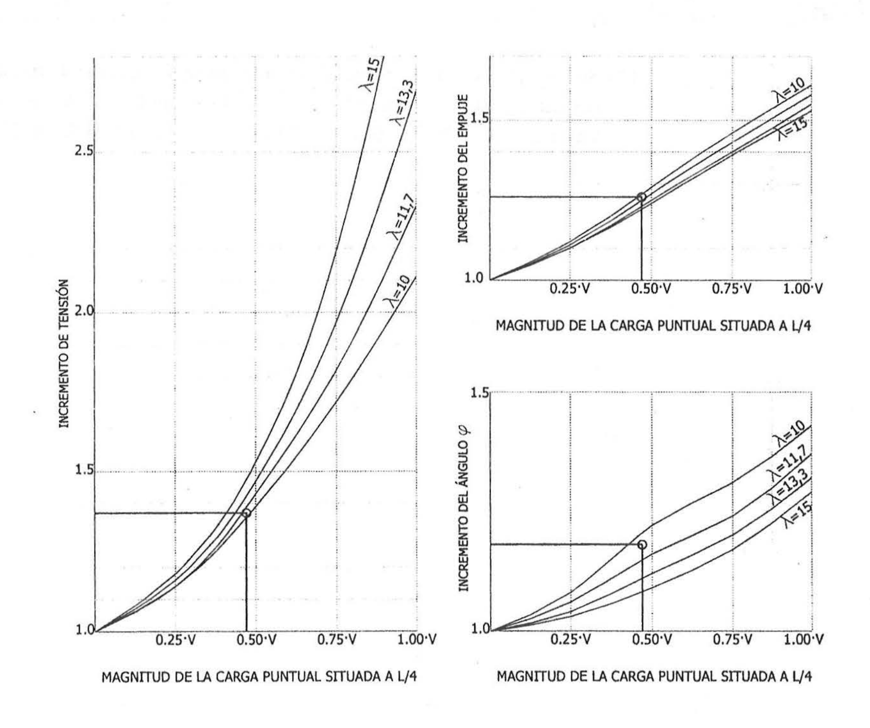
TODOS LOS ARCOS CARGADOS

	Calculado	ábaco	ud	error del ábaco
Carga total q	42,8	42,8	kN/m	0 %
Tensión de las roscas	7,11	7,33	kp/cm²	3 %
Tensión en el salmer	7,84	8,50	"	8 %
Empuje en extremos	50,9	51,3	kN	1 %
Ángulo de incidencia	11,5 º			



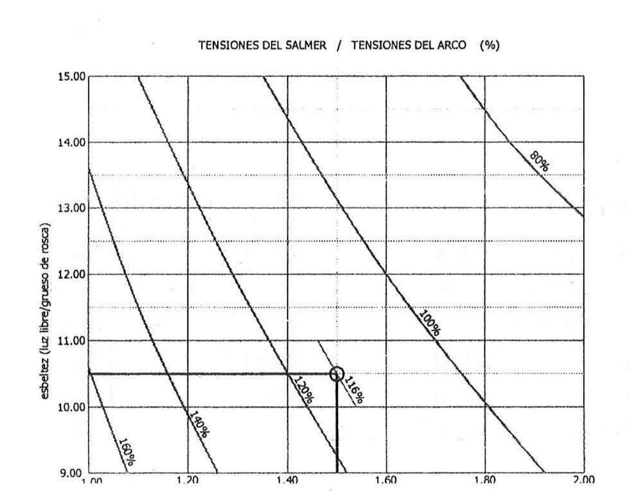
CARGA CONCENTRADA A L/4

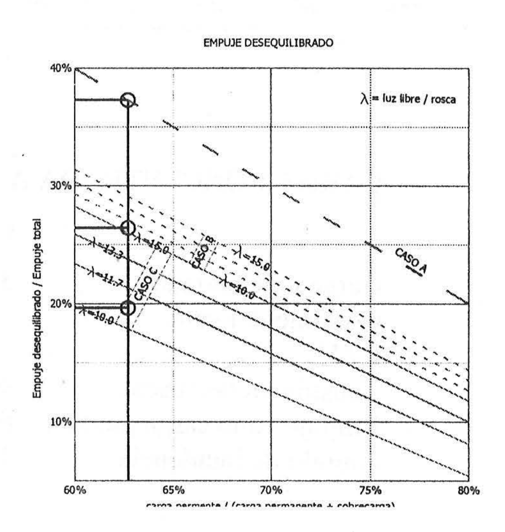
	Calculado	ábaco	ud	error del ábaco
Carga concentrada	31,5	31,5	kN/m	0 %
Cortante del vano	67,5			
P / V	0,467			
Tensión en las roscas	9,70	10,0	kp/cm²	3 %
Empuje vano carga puntual	63,9	64,6	kN	1 %
Ángulo de incidencia	13,5 º	13,6 º		0 %



ALTERNANCIA DE SOBRECARGA

	Calculado	ábaco	ud	error del ábaco
Carga total	42,8	42,8	kN/m	0 %
Carga permanente	26,8	26,8	"	0 %
Tensión en las roscas	7,11	7,33	kp/cm²	3 %
Tensión en el salmer	7,84	8,50	"	8 %
Empuje total en extremo	50,9	51,3	kN	1 %
Empuje desequilibrado (*)	10,5	10,0	kN	5 %





(*) Se ha indicado el diferencial de empuje según el caso C del apartado 2.3 y que resulta de **10** kN = 0,195 · 51,3 kN (siguiendo el ábaco). En el caso B este valor es 13,**5** kN = 0,264 · 51,3 kN y en el caso A, **19,2** kN = 0,374 · 51,3 kN.

NOTAS

NOTAS

CUADERNO

304.01

Cuadernos.ijh@gmail.com
info@mairea-libros.com

